

Krzysztof TOMALCZYK, Bogusław WIĘCEK
POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI

Modelowanie transformatora piezoelektrycznego z uwzględnieniem samonagrzewania

Mgr inż. Krzysztof TOMALCZYK

Krzysztof Tomalczyk ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej na kierunku Elektronika i Telekomunikacja w zakresie energoelektroniki. Główne zainteresowania i tematyka prac badawczych to elektroniczne układy przetwarzania energii (przetwornice, przekształtniki) oparte na nowoczesnych przyrządach półprzewodnikowych (MOSFET, IGBT) ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń wykorzystujących przetworniki piezoelektryczne.

e-mail: krzysztof.tomalczyk@p.lodz.pl



Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Bogusław Więcek specjalizuje się w dziedzinie termografii komputerowej i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermogrametry oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwiennym” – TTP.

e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl



Streszczenie

Artykuł wprowadza w temat zastosowania transformatorów piezoelektrycznych (PT) jako alternatywy dla powszechnych transformatorów z rdzeniem magnetycznym, omawia także najważniejsze problemy występujące przy projektowaniu układów zasilających opartych na PT, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk termicznych. W artykule przedstawiony jest nowy sprzężony model elektro-termiczny uwzględniający zależność częstotliwości rezonansowej od temperatury obliczanej na podstawie strat mocy. Model poprawnie odwzorowuje zjawisko samonagrzewania się PT podczas pracy w zmiennych warunkach w układzie przetwornicy.

Słowa kluczowe: transformator piezoelektryczny, modelowanie elektro-termiczne.

Modeling of a piezoelectric transformer when taking into consideration the self-heating

Abstract

Piezoelectric transformers (PTs) are high quality factor, high efficiency electrical energy transducers based on mechanical coupling between the primary and secondary side. Their power density levels as high as $50\text{W}/\text{cm}^3$ make them very promising alternative to traditional magnetic core transformers, primarily in terms of miniaturization and efficiency. There are, however, some problems slowing down their development, among which thermal management is one of the most important. A PT is a resonant transducer designed to work within an exactly determined narrow frequency range (Fig. 1). It can be modeled with use of a simple single-branch circuit model (Fig. 2) in which a series RLC connection correspond to the main resonance. Our research focuses on a prototype 40W step-down ring-shaped PT (Fig. 3) having the advanced multi-layer structure (Fig. 4). Its main resonance of approx. 322 kHz (Fig. 5) exhibits a tendency to move towards higher frequencies with temperature (Fig. 6). This can possibly induce an undesired positive thermal feedback leading to stability problems and thus should be included in modeling and simulation. We propose a simple coupled electro-thermal model (Fig. 7) in which the resonance frequency shift (Fig. 8) depends on the temperature rise calculated from power losses. Our model, contrary to the traditional isothermal one, allows simulating the self-heating phenomenon and its influence on the key waveforms of the PT working in a converter circuit (Fig. 9).

Keywords: piezoelectric transformer, electro-thermal modeling.

1. Wstęp

Teoretyczne podstawy funkcjonowania transformatorów piezoelektrycznych (PT) zostały opublikowane już w 1956 roku [1]. Dopiero jednak postępy w technologii materiałów piezoelektrycznych dokonane w ostatniej dekadzie pozwoliły na wykorzystanie tej teorii w praktycznych zastosowaniach. Nowe materiały piezoelektryczne, jak np. PZT (cyrkoniano-tytanian ołowiu), osiągają współczynnik dobroci mechanicznej Q_m powyżej 1000. Oznacza to z jednej strony bardzo wąskie częstotliwościowe pasmo pracy,

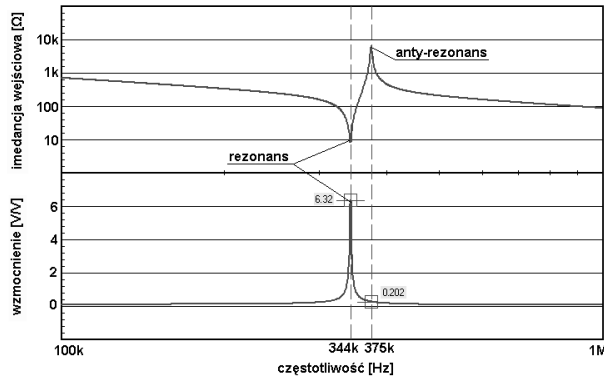
z drugiej jednak strony – potencjalnie bardzo wysoką sprawność energetyczną. Dzięki temu, obok dobrze już znanych czujników i siłowników, pojawiło się nowe zastosowanie technologii piezoelektrycznych – przetwarzanie energii elektrycznej. Transformator piezoelektryczny to w dużym uproszczeniu połączenie wspomnianych już siłownika i czujnika – zmienne pole elektryczne wywołuje w materiale piezoelektrycznym drgania mechaniczne, następnie ponownie zamieniane na zmienne pole elektryczne o innych parametrach. W porównaniu z klasycznym transformatorem elektromagnetycznym, dzięki bardzo wysokiej sprawności oraz pracy z dużymi częstotliwościami, PT jest w stanie osiągnąć znacznie większą gęstość mocy – rzędu $50\text{W}/\text{cm}^3$, co skutkuje zauważalnym zmniejszeniem rozmiarów przetwornika [2]. Dodatkowo korzyści wynikają z naturalnych właściwości ceramicznych materiałów piezoelektrycznych, które w naturalny sposób zapewniają separację galwaniczną pierwotnej i wtórnej strony transformatora, nie generują zakłóceń elektromagnetycznych i są ponadto całkowicie niepalne.

Wymienione powyżej zalety PT czynią z nich bardzo interesującą alternatywę dla powszechnie stosowanych w elektronice transformatorów z uzwojeniami i rdzeniem ferromagnetycznym, nadal jednak nierozwiązane pozostają niektóre problemy, których obecność znacznie utrudnia wprowadzenie PT do masowej produkcji:

- wysokie wymagania stawiane obwodom sterującym pracą PT, zwłaszcza dotyczące stabilności częstotliwości,
- w typowym układzie przetwornicy występuje sygnał prostokątny, którego wyższe harmoniczne mogą pobudzać inne niż pożądany rezonans na charakterystyce PT, co może skutkować wzrostem strat mocy a w konsekwencji także i wzrostem temperatury przetwornika,
- stabilizacja termiczna PT jest niezwykle trudna w realizacji, gdyż większość parametrów materiału piezoelektrycznego jest w różny sposób zależna od temperatury, co prowadzi do jeszcze większej komplikacji obwodów sterujących,
- efektywne odprowadzanie ciepła PT jest również trudne do osiągnięcia – stykowe układy chłodzenia jak np. radiatory nie mogą być stosowane z uwagi na możliwość tłumienia wibracji PT.

Każdy PT jest zaprojektowany do pracy w dokładnie określonym wąskim zakresie częstotliwości w sąsiedztwie tzw. „rezonansu roboczego” (rys. 1). Rezonans ten, szeregowy z elektrycznego punktu widzenia, tworzy lokalne minimum na charakterystyce modułu impedancji wejściowej. Następujący po nim zawsze „anty-rezonans” ma charakter rezonansu równoległego, co skutkuje powstaniem lokalnego maksimum impedancji. Rezonansowi robocemu odpowiada maksimum charakterystyki wzmocnienia napięciowego w relacji wejście - wyjście. W przeciwieństwie do stałej przekładni „zwojowej” klasycznego transformatora, PT charakteryzuje zmienna charakterystyka częstotliwościowa wzmocnienia napięciowego, co jest wykorzystywane w przetwornicach rezonansowych jako metoda regulacji napięcia wyjściowego.

Zakres częstotliwości pracy przetwornicy rezonansowej z PT jest ograniczony do przedziału pomiędzy rezonansem a anty-rezonansem, w którym to obszarze impedancja wejściowa ma charakter indukcyjny, korzystniejszy z punktu widzenia poprawności pracy całego układu przetwornicy od charakteru pojemnościowego.

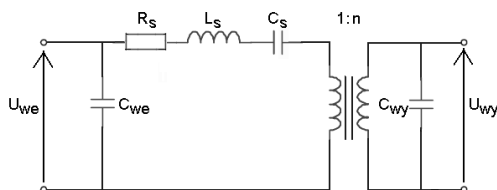


Rys. 1. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe PT
Fig. 1. Exemplary PT frequency characteristics

2. Klasyczny model obwodowy transformatora piezoelektrycznego

Zakładając, że na charakterystyce częstotliwościowej PT występuje tylko jeden rezonans „roboczy” oraz odpowiadający mu anty-rezonans, PT może zostać przedstawiony za pomocą tzw. „modelu jednogałęziowego” (rys. 2) [3]:

- szeregową gałąź $R_S-L_S-C_S$ modeluje elektrycznie rezonans szeregowy, będący w rzeczywistości rezonansem mechanicznym odpowiadającym fali stojącej wzdłuż jednego z wymiarów struktury PT,
- transformator idealny o przekładni $1:n$ definiuje stosunek napięć wejściowego do wyjściowego dla częstotliwości rezonansowej, w warunkach braku obciążenia,
- pojemności C_{we} i C_{wy} to wartości zmierzone na zaciskach wejściowych i wyjściowych,
- anty-rezonans powstaje w obwodzie równoległym składającym się z gałęzi C_{we} oraz gałęzi $R_S-L_S-C_S$ mającej charakter indukcyjny powyżej własnego rezonansu szeregowego.



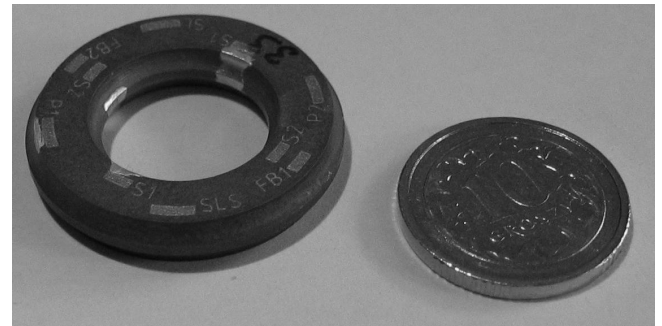
Rys. 2. Jednogałęziowy model obwodowy PT [3]
Fig. 2. Single-branch PT circuit model [3]

Model jednogałęziowy jest poprawny jedynie w wąskim zakresie częstotliwości w pobliżu rezonansu roboczego, jednak stanowi on dobre przybliżenie, jeżeli inne rezonanse występujące na charakterystyce rozważanego PT są pomijalnie małe lub wystarczająco odległe od rezonansu głównego. Istotne jest także, by nie występowały one w pobliżu nieparzystych wielokrotności roboczego zakresu częstotliwości, co mogłoby spowodować istotne błędy w odwzorowaniu pracy PT z sygnałem prostokątnym w układzie przetwornicy [4]. W praktyce powyższe warunki spełnione są dla PT o prostej strukturze geometrycznej jak np. prostopadłościan.

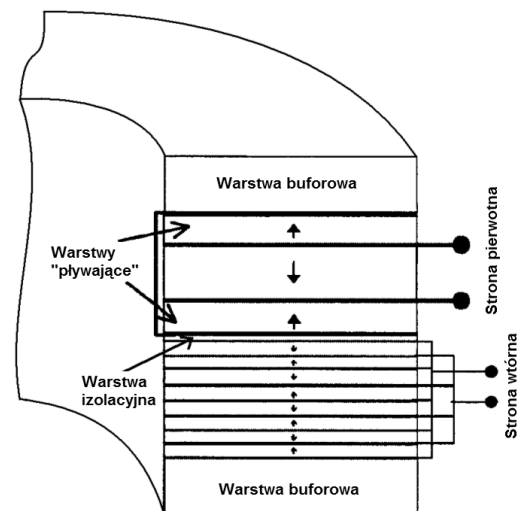
3. Opis badanego PT na tle obecnego stanu techniki

Obecnie produkowane i dostępne na rynku PT to przetworniki w formie prostopadłościennej płytki o powierzchni kilku cm^2 i grubości kilku mm, przystosowane do pracy w układach podwyższających napięcie. Ich moc nie jest zwykle zbyt wysoka – rzędu pojedynczych watów, dlatego pracują one ze stosunkowo niskimi częstotliwościami – na poziomie kilkudziesięciu kHz. Obszar zastosowań takich PT jest względnie niewielki, gdyż wysokie napięcia służą obecnie głównie do zasilania lamp wyładowczych stosowanych jako podświetlenie matryc monitorów LCD. Dopiero rozpowszechnienie PT obniżających napięcie pozwoli na istotny przełom w elektronice użytkowej – dzięki eliminacji tradycyjnych transformatorów możliwa będzie znaczna miniaturyzacja zasilaczy sieciowych, które stanowią jeden z podstawowych komponentów praktycznie każdego urządzenia elektronicznego. Jest to powód, dla którego badania skoncentrowano właśnie na prototypach PT obniżających napięcie.

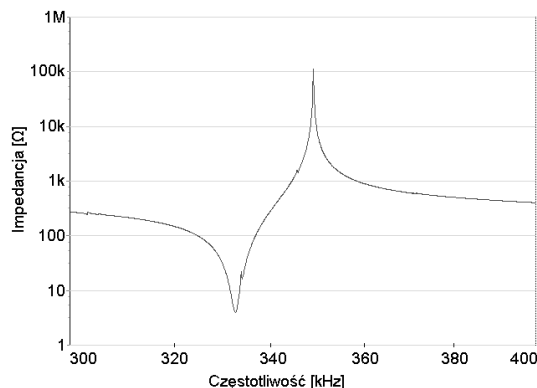
Obecnie badany PT to prototypowy przetwornik w formie pierścienia o średnicy kilkunastu mm i grubości kilku mm (rys. 3), o strukturze wielowarstwowej (rys. 4). Jest to PT o deklarowanej mocy 40W, zaprojektowany do pracy w układzie obniżającym napięcie. Rezonans roboczy tego PT występuje przy częstotliwości około 332 kHz (rys. 5).



Rys. 3. Widok badanego PT
Fig. 3. External view of the investigated PT



Rys. 4. Struktura wewnętrzna badanego PT [5]
Fig. 4. Internal structure of the investigated PT



Rys. 5. Zmierzona charakterystyka impedancji wejściowej badanego PT
Fig. 5. Measured input impedance characteristic of the investigated PT

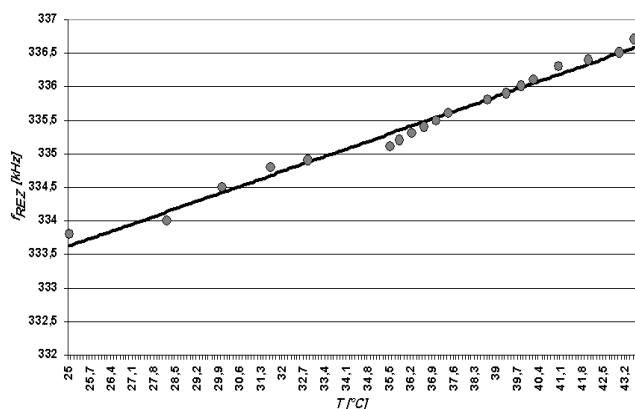
Powyższą charakterystykę odwzorowuje model jednogłęziowy (rys. 2) o parametrach podanych w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry modelu badanego PT
Tab. 1. Model parameters of the investigated PT

Parametr	C_{we}	R_S	L_S	C_S	n	C_{wy}
Wartość	1,25 nF	2,7 Ω	1,86 mH	151 pF	0,13	40 nF

4. Uwzględnienie wpływu temperatury na parametry modelu

Jak wynika z uwag przytoczonych we wstępie, większość problemów hamujących rozwój układów zasilających opartych na PT ma związek z niestabilnością temperaturową parametrów materiałów piezoelektrycznych. Z punktu widzenia wymagań stawianych układowi sterującemu pracą PT, najważniejszym skutkiem tego zjawiska jest zależność częstotliwości rezonansu roboczego od temperatury przetwornika (rys. 6). Wielkość przesunięcia rezonansu roboczego na osi częstotliwości w zakresie dopuszczalnych temperatur pracy PT może być nawet porównywalna z szerokością całego pasma pracy, co czyni niezbędnym uwzględnienie wpływu temperatury przy modelowaniu i projektowaniu układu zawierającego rozważany przetwornik.



Rys. 6. Zależność częstotliwości rezonansowej badanego PT od temperatury
Fig. 6. PT resonance frequency vs. temperature

Jak wynika z rys. 6, częstotliwość rezonansowa rośnie wraz ze wzrostem temperatury PT i ma charakter dający się z dobrą dokładnością aproksymować linią prostą. W przypadku badanego PT prosta dopasowana do charakterystyki pomiarowej przy użyciu metody regresji liniowej jest opisana zależnością:

$$f_{REZ} = 329,6 + 0,16 T, \quad (1)$$

gdzie częstotliwość rezonansowa f_{REZ} wyrażona jest w kHz a temperatura T w °C.

Aby model obwodowy uwzględniał wpływ temperatury, należy uzależnić od niej przynajmniej jeden z jego parametrów decydujących o częstotliwości rezonansu roboczego. Jeżeli pominąć relatywnie niedużą wartość rezystancji szeregowej R_S , częstotliwość rezonansową można określić zależnością:

$$f_{REZ} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C'}}, \quad (2)$$

gdzie:

$$C' = \frac{C_S n^2 C_{wy}}{C_S + n^2 C_{wy}} \approx 123 * 10^{-12} F. \quad (3)$$

Z równań (1) oraz (2) otrzymujemy:

$$L_S(T) = \frac{1}{C' 4\pi^2 (329600 + 160T)^2}. \quad (4)$$

Temperatura musi zostać wprowadzona do modelu jako dodatkowa zmienna obwodowa, zależna z kolei od mocy traconej w PT:

$$T = T_a + P_{PT} R_{th}, \quad (5)$$

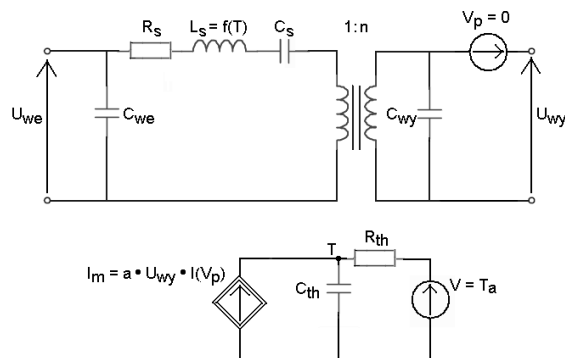
gdzie T_a to temperatura otoczenia a R_{th} to rezystancja termiczna PT wynosząca w badanym przypadku około 20 °C/W mocy traconej w przetworniku.

Z uwagi na prostotę modelu jednogłęziowego, nie oddaje on natury strat mocy w PT, która może być zarówno mechaniczna jak i elektryczna. Z analizy danych doświadczalnych wynika jednak, że straty mocy w PT są w normalnych warunkach pracy proporcjonalne do mocy oddawanej na wyjściu, wobec czego można posłużyć się zależnością:

$$P_{PT} = a U_{wy} I_{wy}, \quad (6)$$

gdzie a to współczynnik proporcjonalności między mocą oddawaną na wyjściu a traconą w PT. W przypadku badanego PT pracującego w dopuszczalnym zakresie częstotliwości z sygnałem sinusoidalnym wynosi on około 0,17.

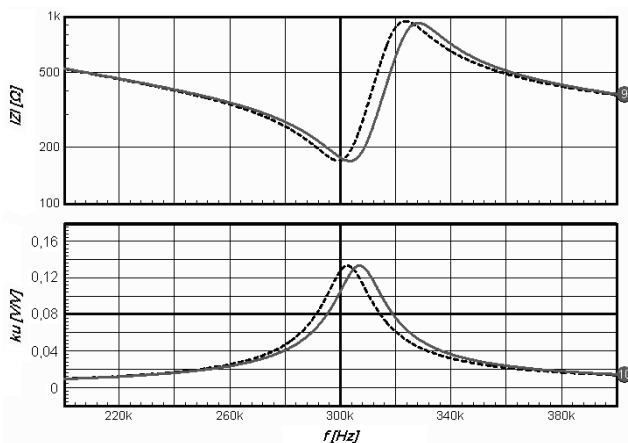
Ostateczny kształt obwodowego modelu elektro-termicznego do celów symulacji w środowisku typu SPICE przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Model elektrotermiczny badanego PT do symulacji w środowisku SPICE
Fig. 7. Coupled electro-thermal model of the PT for SPICE simulation purposes

Dodatkowe niezależne źródło napięciowe V_p o zerowej wartości służy do pomiaru prądu wyjściowego. Obwód konwersji mocy na temperaturę zawiera sterowane źródło prądowe, którego wartość jest iloczynem prądu i napięcia wyjściowego PT oraz współczynnika proporcjonalności a . Prąd źródła I_m odpowiada więc wielkości P_{PT} w równaniu (5), natomiast napięcie w węzle oznaczonym jako T liczbowo równe jest wynikającej z tego samego równania wartości temperatury w stanie quasiustalonym. Pojemność C_{th} odpowiada za odwzorowanie dynamiki układu termicznego i jest wyznaczana z zależności $C_{th} = \rho V c_w$, gdzie ρ , V , c_w to gęstość, objętość i ciepło właściwe materiału ceramicznego, z którego wykonany jest PT. R_{th} wyznaczono doświadczalnie na podstawie stałej czasowej procesu nagrzewania lub stygnięcia elementu. Wartość T podstawiana jest następnie do wzoru (4) wpływając w ten sposób na wartość elementu L_S a tym samym na częstotliwość rezonansu roboczego.

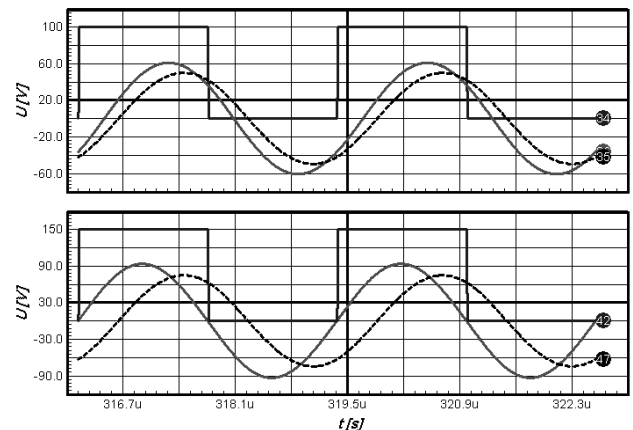
Wpływ temperatury na charakterystyki częstotliwościowe PT przedstawiony jest na rys. 8. Wzrost temperatury powoduje przesunięcie się charakterystyk impedancji wejściowej oraz wzmocnienia w stronę wyższych częstotliwości. Jeżeli układ przetwornicy z PT pracuje z dowolną częstotliwością z optymalnego zakresu pomiędzy rezonansem a anty-rezonansem, będzie to prowadzić do wzrostu wzmocnienia a tym samym do zwiększenia mocy wydzielanej w PT. Zwiększona moc prowadzi z kolei do dalszego wzrostu temperatury, możemy więc mówić o niebezpiecznym zjawisku dodatniego sprzężenia termicznego (efekt samonagrzewania).



Rys. 8. Charakterystyki częstotliwościowe badanego PT obciążonego rezystancją $3,6 \Omega$ dla temperatury równej temperaturze otoczenia ($\Delta T = 0$, linie kreskowe) oraz dla $\Delta T = 30K$ (linie ciągłe)

Fig. 8. Frequency characteristics of the PT loaded with $3,6 \Omega$ resistance for ambient temperature (dashed lines) and $\Delta T = 30K$ (solid lines)

Sprężenie termiczne najlepiej obrazują charakterystyki dynamiczne pozwalające porównać przebiegi czasowe wybranych wielkości obwodowych dla różnych warunków pracy PT. Na rys. 9 widoczne są przebiegi symulacyjne napięcia wejściowego (prostokątne) i wyjściowego (sinusoidalne) badanego PT obciążonego rezystancją $3,6 \Omega$ dla częstotliwości 310 kHz . Napięcie zasilania przetwornicy, w której pracuje badany PT wynosiło $100V$ (górną część rysunku) lub $150V$ (część dolna). Napięcia wyjściowe dla zwiększenia czytelności wykresów wyskalowane są z pominięciem przekładni $1:n$, stąd ich zawyżone wartości. Przy zastosowaniu tradycyjnego modelu izotermicznego, zwiększenie napięcia zasilania skutkuje jedynie proporcjonalnym wzrostem amplitudy napięcia wyjściowego (linie kreskowe). Model elektro-termiczny uwzględnia straty mocy w PT i wynikający z nich wzrost temperatury – częstotliwość rezonansowa zwiększa się i zbliża do częstotliwości pracy, skutkiem czego następuje wzrost amplitudy napięcia wyjściowego (linie ciągłe). Wraz ze zbliżaniem się do częstotliwości rezonansowej maleje także przesunięcie fazy między napięciem wejściowym i wyjściowym (rys. 9).



Rys. 9. Przebiegi czasowe napięć wejściowych (prostokątne) i wyjściowych (sinusoidalne) badanego PT w układzie przetwornicy – wyniki symulacji z zastosowaniem modelu izotermicznego (linie kreskowe) i sprzężonego elektro-termicznego (linie ciągłe)

Fig. 9. Transient input (square-wave) and output (sinusoidal) voltage waveforms of the investigated PT – simulation results with use of an isothermal model (dashed lines) and coupled electro-thermal model (solid lines)

5. Wnioski

Transformatory piezoelektryczne to niezwykle obiecująca alternatywa dla transformatorów tradycyjnych, ich obecny obszar zastosowań jest jednak jeszcze stosunkowo niewielki, co w dużym stopniu spowodowane jest trudnościami w zapewnieniu stabilności termicznej tego typu przetworników energii. Zjawisko samonagrzewania się PT podczas pracy, skutkujące istotną zmianą jego parametrów nie może zostać pominięte na etapie projektowania jakiegokolwiek układu opartego o taki transformator. Dotychczas stosowane modele obwodowe PT nie uwzględniają wpływu temperatury na charakterystyki transformatora, co uniemożliwia wzięcie pod uwagę potencjalnie groźnego zjawiska dodatniego sprzężenia termicznego. Zaproponowany w artykule prosty sprzężony model elektro-termiczny do symulacji w środowiskach typu SPICE, przy odpowiednim doborze wartości jego parametrów, stanowić może bardzo przydatne narzędzie przy projektowaniu opartych na PT układów przetwornic, gdzie w zależności od napięcia zasilania, obciążenia czy innych warunków pracy, straty mocy mogą istotnie wpływać na zmianę temperatury układu a co za tym idzie – na właściwości transformatora.

6. Literatura

- [1] C.A. Rosen: Ceramic transformers and filters, Proc. Electronic Comp. Symp., 1956, pp. 205-211.
- [2] T. Bove, W. Wolny, E. Ringgaard and K. Breboel: New type of piezoelectric transformer with very high power density, ISAF 2000, Vol.1, 2000, pp. 321 – 324.
- [3] Ray-Lee Lin: Piezoelectric transformer characterization and application of electronic ballast, Ph.D. Dissertation, Virginia Tech, November 2001.
- [4] K. Tomalczyk, K. Napiórkowski: Influence of Harmonics on the Efficiency of a Piezoelectric Transformer, 16th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2009, Łódź, 25-27 June 2009, 2009.
- [5] J.A. Oliver, R. Prieto, M. Sanz, J.A. Cobos and J. Uceda: 1D modeling of multi-layer piezoelectric transformers, PESC 2001, Vol.4, 2001, pp. 2097 – 2102.